

波浪中の燃料消費量変化に関する実験的研究

著者	宮島 一貴
学位授与機関	東京海洋大学
学位授与年度	2013
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00001010/

修士学位論文

波浪中の燃料消費量変化に関する実験的研究

平成 25 年度

(2013 年 9 月)

東京海洋大学大学院

海洋科学技術研究科

海運ロジスティクス専攻

宮島 一貴

目次

第 1 章	緒論	
1. 1	緒言	1
1. 2	本研究の目的と概要	2
第 2 章	汐路丸による実船実験	
2. 1	緒言	3
2. 2	実験の条件と方法	3
2. 3	実験結果	5
第 3 章	回流水槽における拘束模型試験	
3. 1	緒言	7
3. 2	回流水槽	7
3. 3	模型船	9
3. 4	計測装置	10
3. 5	実験条件	19
3. 6	実験方法	21
第 4 章	実験結果	
4. 1	緒言	22
4. 2	本実験における電圧	22
4. 3	モータ消費電力の計測結果	23
4. 4	プロペラ負荷による電力変化の推定	26
4. 5	モータによる電力消費量の推定	27
4. 6	実船実験との比較	29
4. 7	結言	31
第 5 章	結論	32
	参考文献	33
	謝辞	34
	Appendix	35

第 1 章 緒論

1.1 緒言

船舶の運航コストにおいて燃料消費量の占める割合は非常に大きく、航海中の燃料消費をいかに抑えるかは極めて重要な問題である。近年国際海運の分野において、地球温暖化問題に対する社会的関心が高まっており、省エネや二酸化炭素排出量削減など地球温暖化対策に対する要求が高まっている。温室効果ガスの排出量を削減するために、国際海事機関(IMO : International Maritime Organization)は、2011 年 7 月に行われた第 62 回海洋環境保護委員会(MEPC : Marine Environmental Protection Committee)において、エネルギー効率設計指標(EEDI : Energy Efficiency Design Index)および船舶エネルギー効率管理計画書(SEEMP : Ship Energy Efficiency Management Plan)を強制化した。

船舶管理会社と船舶運航者の間において、エネルギー効率運航指標(EEOI : Energy Efficiency Operational Indicator)は SEEMP のツールとして位置づけられ、減速航海・ウェザールーティング・ジャストインタイム入港は、SEEMP の評価に関して最も有効と考えられている。

船舶の運航における推進効率および燃料消費量をより正確に推定することが出来れば、運航コストの削減および温室効果ガスの排出量削減に繋がるため非常に重要である。しかし、推進効率および燃料消費量と海象条件についての理論的検討は行われている⁽¹⁾ものの、未だ十分とは言えない。また、ウェザールーティングにおける船速およびエンジン出力は、理論計算および統計解析を用いて算出されたパフォーマンスカーブにより推定⁽²⁾している。波浪中における船速は、平水中における船速から波浪中における減速量を減ずることにより算出している。波浪中における船のエンジン出力は、同じ回転数でも速力が小さいほどエンジン出力は大きくなるという特性を用い、航海データにおけるエンジン出力の実測値とプロペラ回転数の関係から波浪中における減速量を考慮して推定されており、必ずしも実船の性能を十分表現できているとは言えない⁽²⁾。

一方で井関らによる先行研究⁽³⁾においては、実船実験により正確な燃料消費量の推定には、波高および波向の影響を十分考慮すべきであり、波高と波向をパラメータとした燃料消費量のデータベース構築が必要であると指摘されている。井関らの研究⁽³⁾の詳細は第 2 章に示す。

1.2 本研究の目的と概要

船舶の燃料消費量の推定は前節で述べたように非常に重要である。井関らによる先行研究⁽³⁾においては、実船実験により正確な燃料消費量の推定には、波高および波向の影響を十分考慮すべきであり、波高と波向をパラメータとした燃料消費量のデータベース構築が必要であると指摘されている。しかし実船実験によってデータベースを構築するには、種々の海象条件下を航行する必要があるとあり、時間的制約と燃料コストの問題があり、波高と波向をパラメータとした燃料消費量のデータベースの作成は事実上不可能である。模型船実験によるデータベースの作成が有力であると考えられるが、今まで燃料消費量を推定するための模型船実験は行われていない。

そこで本研究では、燃料消費量を推定することを目的として、模型船のプロペラ回転数を一定に保つシステムを開発し、本学の垂直循環型回流水槽において、流速変化によりプロペラに掛かる負荷を変化させ、モータの電力消費量の変化を計測した。波浪によるエネルギー変化はないが、船速の変化を再現することで波浪中における燃料消費量の推定を行った。回流水槽では流れを発生させた中で模型船を拘束して実験を行うので時間を掛けて計測を行うことが可能であり、船体に掛かる抵抗値も計測可能なためモータの消費電力のみを算出可能である。

船舶の運航において、燃料消費量が増加する理由は

1. 風による船体及び上部構造物での抵抗増加
2. 上下動および縦揺れによる抵抗増加
3. 船体による造波抵抗
4. 斜航角・横滑り・ヨーイング・左右動・舵による抵抗増加
5. プロペラ作用における平水中と波浪中の差異による推進効率の損失
6. エンジン出力の自主的低減

が挙げられる⁽¹⁾。本研究においては、5のみを考慮しており、5が起こる原因のうち

- 抵抗増加によるプロペラ過負荷
- プロペラへの流入速度の違いによる速度変化
- プロペラ周りにおける水流の速さおよび方向を変化させる運動

を実験により検証した。

第 2 章 実船実験

2.1 緒言

本章では井関らによる研究⁽³⁾で行われた実船実験について詳述する。

2.2 実験の条件および方法

2012 年 1 月 25 日、東京海洋大学附属練習船汐路丸を用いた実船実験は千葉県洲崎沖で行われた。汐路丸の外観および仕様を Fig. 2.1 および Table 2.1 に示す。汐路丸は可変ピッチプロペラを装備しており、燃料消費量の変化および波浪による船体運動の計測のために、可変ピッチプロペラの翼角を 10.5 度に設定し 90 分間直進および変針を繰り返し航行した。Table 2.2 には汐路丸の針路および対水速力、また真風向・真風速を示し、実験の航跡図を Fig. 2.2 に示す。実験の際の風浪は波高 1.0-1.5 m、周期 6-7 sec、波向 200-240 degrees であり、うねりは波高 2-3 m、周期 8-10 sec、波向 200 degrees であった。

燃料消費量は各航行の始めと終わりに燃料流量計および燃料温度計を計測し求めた。



Fig. 2.1 The training ship Shioji-maru

Table 2.1 Principal particulars of T.S. Shoji-maru

Length (P.P.)	46.00 (m)
Breadth (M _{LD})	10.00 (m)
Depth (M _{LD})	6.10 (m)
Draught (M _{LD})	2.65 (m)
Displacement	659.4(t)
Main engine	4 cycle diesel 1,030 kw × 700 rpm

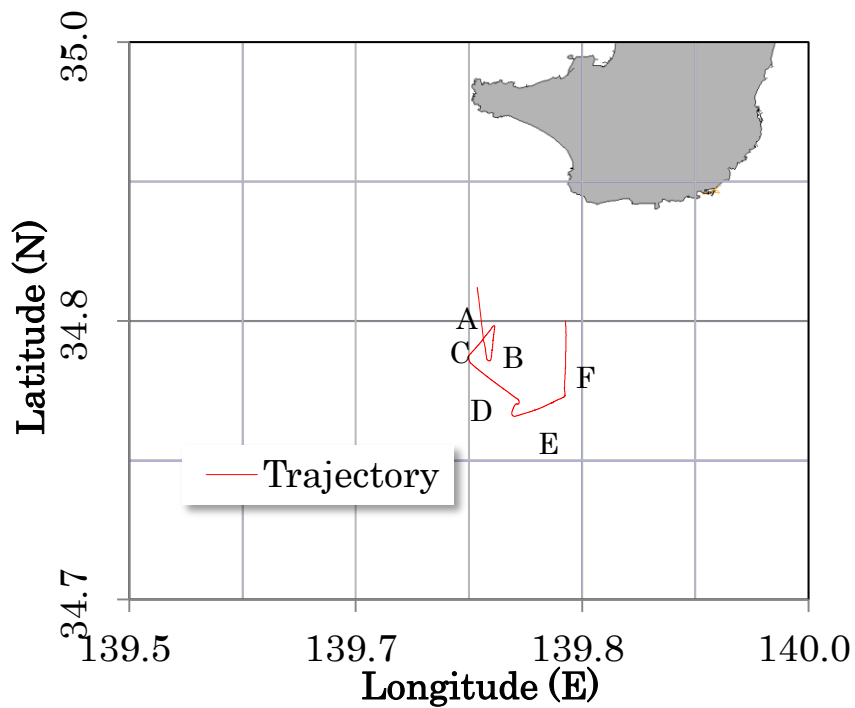


Fig. 2.2 The experimental area at the south of Sunosaki cape and the ship trajectory

Table 2.2 Ship course and the sea conditions

Run	Ship course (deg)	Ship speed (knots)	Wind direction (deg)	Wind speed (m/s)
A	180	8.3	257	10.4
B	000	10.4	260	11.5
C	240	7.3	265	11.5
D	120	9.9	258	11.8
E	060	10.7	267	11.5
F	000	10.5	267	11.4

2.3 実験結果

Table 2.3 は各航行におけるメインエンジン出力と燃料消費量を示している。可変ピッチプロペラの翼角は 10.5 度一定であるため、各航行の計測結果の変化は海象による影響であると言える。

Fig. 2.3 は燃料消費量とメインエンジン出力の関係をグラフにて示した。横軸はメインエンジン出力 (kw)を示し、縦軸は燃料消費量 (kg/h)を示している。Fig. 2.3 からメインエンジン出力と燃料消費量が比例関係にあるという知見がわかる。その結果、燃料流量計の計測なしにメインエンジン出力から燃料消費量を推定できることが言える。

Fig. 2.4 は各航行の針路による船速変化とメインエンジン出力変化を示している。マーカーは計測結果を示し、正弦曲線は調和解析の結果を示している。Fig. 2.4 の計測結果は波浪による速力低下だけでなく、エンジン回転数維持のための追加出力も示している。加えて計測結果の推移は正弦関数で近似できる。プロペラ効率には船体運動と波向による流体粒子の運動に大きく影響を受けるため、正面向い波状態で船速が最も低下しメインエンジン出力は最大となる。したがって、この図より波向は目視による観測結果と同じ約 230 度と言える。またメインエンジン出力の近似正弦曲線の片振幅は 61 kw であり、平均出力の約 12 %である。理論上では、片振幅は波高と可変ピッチプロペラの翼角であると想定される。したがって、振幅関数の推定または必要エンジン出力データベースの構築を行う理論方程式を開発ができ、燃料消費量の推定は波浪のパラメータを知ることによって推定が可能である。つまり船舶から排出される温室効果ガスの削減を可能とする環境対応型航行支援装置の開発の可能性を示している。

Table 2.3 Main engine power and fuel consumption

Run	Main engine shaft power (kw)	Fuel consumption (kg/h)
A	538	88.6
B	466	78.7
C	571	93.5
D	474	79.8
E	455	77.1
F	465	78.4

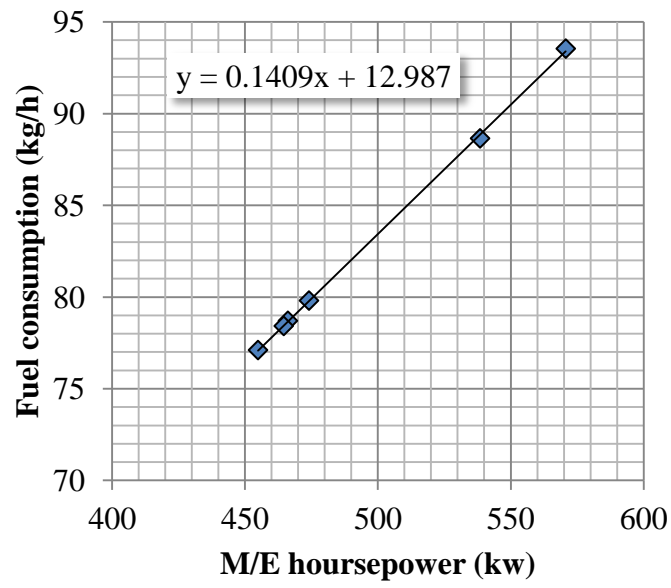


Fig. 2.3 Relationship between the fuel consumption and the M/E horse power

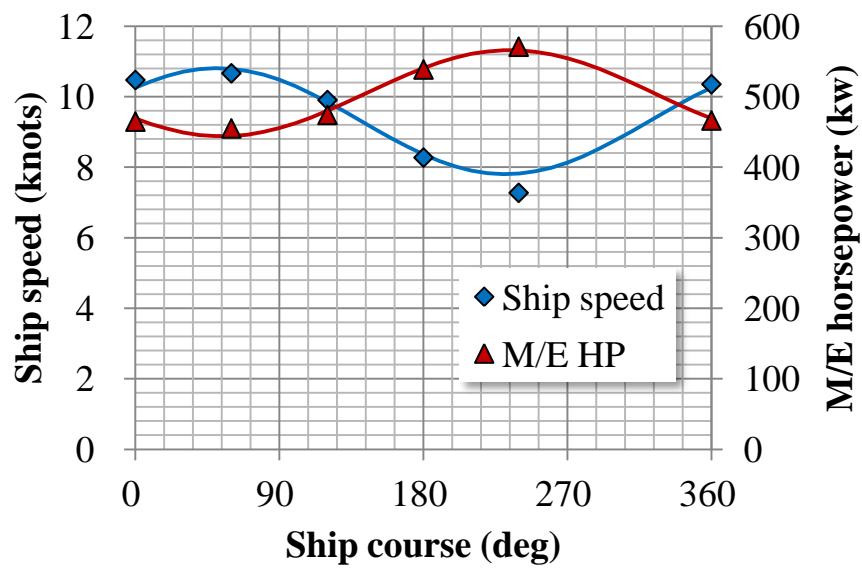


Fig. 2.4 Change of the ship speed and the M/E horse power with the ship course

第3章 回流水槽における拘束模型試験

3.1 緒言

本章では本実験で使用した回流水槽・模型船・その他計測装置の説明と実験条件・実験手順について詳述する。

3.2 回流水槽

航行状態におけるモータの消費電力を計測するために、本学の垂直循環型回流水槽(Fig. 3.1 & Table 3.1)を用いて拘束模型試験を行った。回流水槽は2つのインペラ(推進装置)、インバータ制御方式であり、表面加速装置の併用により、速力 2.5m/s までの範囲で乱れの少ない流れを発生させることができる。

回流水槽における模型船の船速低下は、模型船のプロペラ回転数を一定に保ち流速を変化させることで実現した。



Fig.3.1 Circulating water channel used for measurement of the ship-bank interaction forces

Table 3.1 Principal particulars of the circulating water channel of TUMSAT

Type	Vertical circulation with 2 impellers V2-30C
Main body	12.4m(L) × 2.3m(B) × 5.2m(H)
Observation part	3.3m(L) × 1.5m(B) × 0.8m(D)
Windowpane (tempered)	Side: 2.5m(L) × 0.8m(H) × 2 Bottom: 2.0m(L) × 0.8m(H) × 1
Flow speed	0 ~ 2.5m/s
Control	Inverter control

3.3 模型船

実験には本学の練習船「汐路丸」の 1/40 模型を用いた。計測時の模型船外観を Fig.3.2 に、実船と模型船の主要寸法を Table 3.2 に示す。模型船中央に取り付けられたパンタグラフによって Heaving と Pitching を自由とし、その他の運動を拘束した。

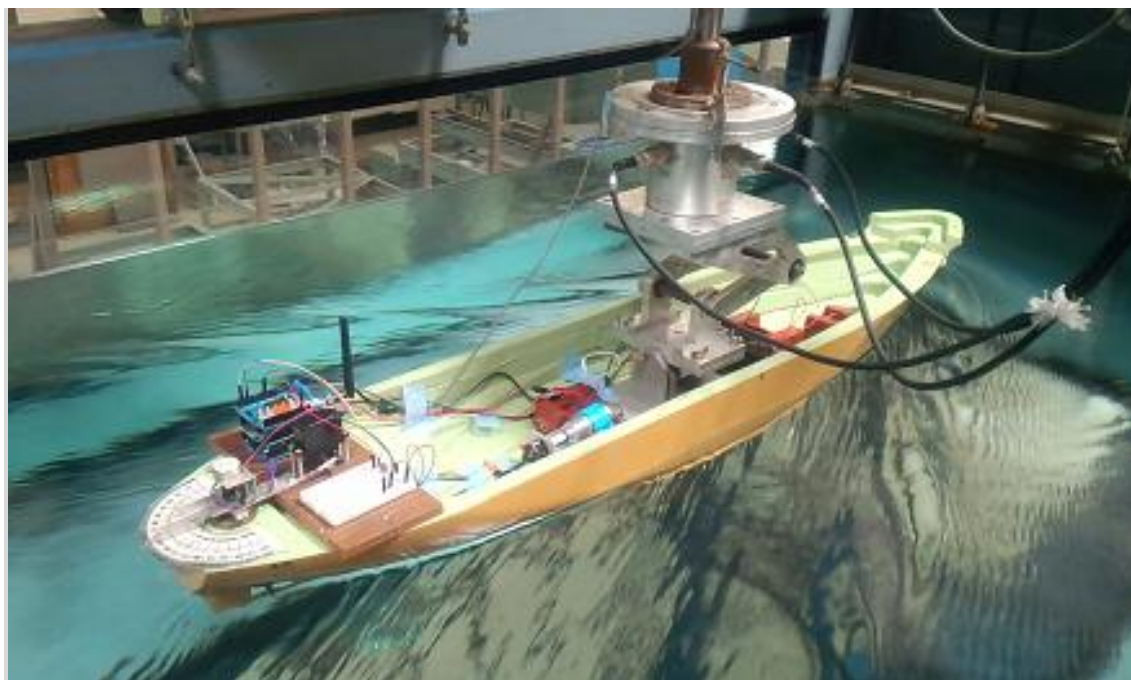


Fig. 3.2 The model ship equipped the load cell for measurement of fluid dynamic forces

Table 3.2 Principal dimensions of the full-scale ship and the model

	Ship	Model
Lpp	46.0m	1.150m
B	10.0m	0.250m
D	6.0m	0.150m
T(Draft)	2.65m	0.066m
Displacement	659t	10.1kg

3.4 計測装置

本実験で使用した計測機器を以下に記述する。模型船は三分力計を介したロッドで PMM 装置と繋がり、モータ電源用のケーブルは三分力計に力を掛けないように外部電源と接続した。模型船内には制御用のデバイス Arduino および Arduino 用の電源を設置した。また制御信号はノート PC から USB ケーブルによって送受信した。

- 三分力計

日章電機株式会社製三分力計 LMC-3504-50N によって船首尾方向の x 軸と船首尾線に対して直角で水平方向の y 軸の流体力および船首尾線に対して直角で垂直方向の z 軸まわりのモーメントを計測した。定格負荷はそれぞれ $F_x:50(N), F_y:50(N), M_z:20(Nm)$ である。計測された値はアンプと A/D 変換器 DriverLinux を介してパソコンに記録した。

- 流速計

流速は株式会社ケネック製プロペラ式流速計(本体部 VO-101A 検出部 VOT2-100-10)を使用した。5 秒ごとに出力される平均流速を水槽内流速とし記録した。

- 回転数計

回転数計は ROHM 製反射型フォトセンサ RPR-220 を用い、反射率の違いから白と黒の色を検知し、黒色の観測時間を基に回転数を算出した。作成した回転数計を Fig 3.3 に示す。

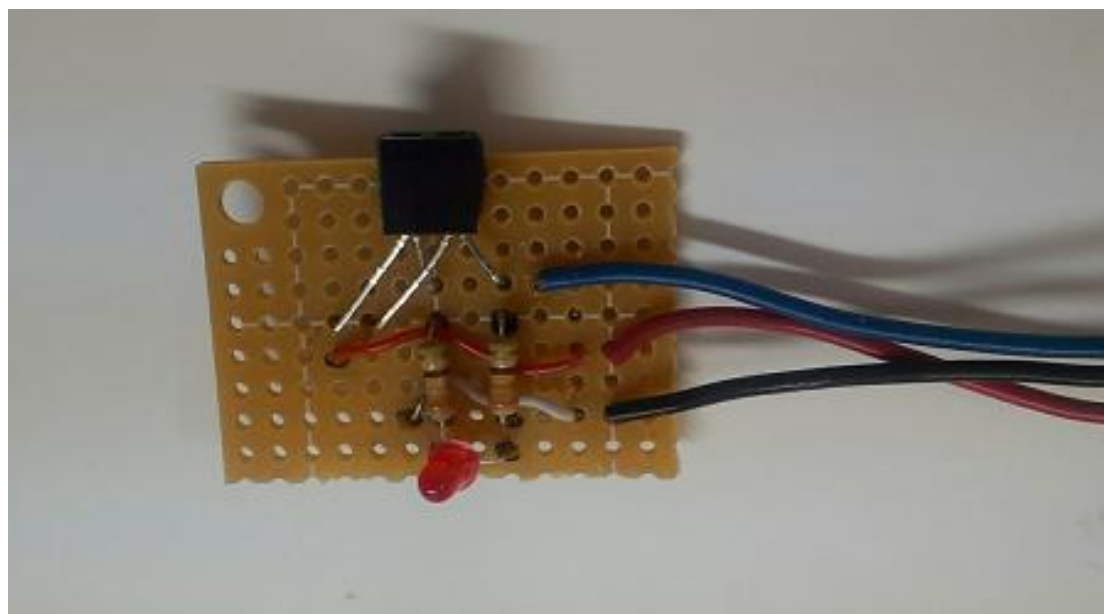


Fig. 3.3 RPM Counter by using reflective type photo sensor

- モータ

三分力計にて計測される x 軸方向の流体力を打ち消し燃料消費量を推定するため、模型船にモータを取り付けてプロペラ推力を得た。モータは **Arduino Motor Shield** によって回転制御され電源は外部電源から供給した。Fig. 3.4 では本実験で使用したモータを示す。Fig. 3.5 にはモータのトルク曲線⁽⁴⁾を示す。モータとプロペラのギア比は 11.5:1 (遊星歯車が 23:6、減速歯車が 3:1)である。

回転数を一定に制御する際、モータは負荷が増大したら、回転数を維持するため電流を大きくする必要がある。これはディーゼルエンジンにおいてエンジン出力を上げることと同義であり、ディーゼルエンジンとモータは原動機として類似している。そのためモータの特性、主に逆起電力を考慮することでモータを用いてディーゼルエンジンの出力を推定することが可能である。



Fig. 3.4 Direct current motor

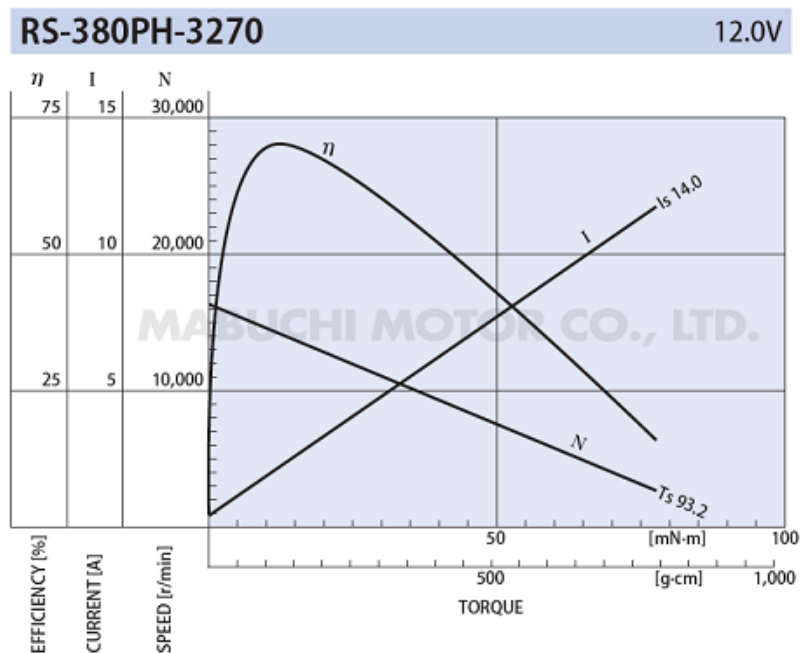


Fig. 3.5 Motor torque curve

- プロペラ

本実験で用いたプロペラは3翼固定ピッチプロペラであり、直径55mm、ピッチ14.5cmである。Fig. 3.6に本実験で用いたプロペラを示す。汐路丸のプロペラは4翼可変ピッチプロペラであり、直径2.2m、実船実験で用いた可変ピッチプロペラの翼角は10.5度である。



Fig. 3.6 Propeller

- オシロスコープ

PWM制御による供給電圧およびモータの逆起電力を計測するために、岩通株式会社のデジタルストレージスコープ DS-8706 簡測王を使用した。Fig. 3.7に外観を示す。



Fig. 3.7 Digital storage scope.

- Arduino UNO R3

模型船のプロペラ回転数を制御するために Atmel 社の AVR マイクロコントローラ ATmega328P を実装したハードウェア Arduino UNO R3 を使用した。

ATmega328P は 2 つの 8 ビットタイマカウンタ、1 つの 16 ビットタイマカウンタ、6 つの PWM 出力、1 つのシリアルポート、6 チャンネルの 10 ビット A/D コンバータを含む 23 の設定可能な I/O ピンを有する 28 ピンの 8 ビットマイコンである。動作電圧は 1.8~5.5V、動作速度は 0~20MHz となっている。メモリ容量はフラッシュメモリ 32KB、EEPROM1KB、SRAM2KB である⁽⁵⁾。

Arduino UNO R3 は上記の AVR マイコンのほか 16MHz 水晶発振子、USB シリアル変換プログラムの書き込まれた ATmega8U2、5V と 3.3V のレギュレータ、ATmega328P のピンと接続されたピンソケット等が実装されている。開発環境の Arduino ソフトウェア(以下、Arduino IDE)は gcc と Java を使っているため Windows, Mac OS X, Linux といった種々の OS で開発可能である。本研究では Windows7(64bit)を使用した。

Arduino を用いるメリットとして以下のことが挙げられる。

- Arduino IDE の多彩な標準ライブラリにより開発が容易である。
- Arduino がプログラムライターを兼ねている。
- 4クロックで1命令の PIC に比べ1クロックに1命令の高速な CPU である AVR マイコンが実装されている。
- 計算機と USB で接続できる。
- シールドを用いることで容易に機能を拡張できる。
- はんだ付け不要でジャンパーワイヤのみでセンサー等の外部デバイスと接続が可能である。



Fig. 3.8 Arduino UNO R3

- Arduino Motor Shield

模型船のプロペラ回転数を PWM 制御するために STMicroelectronics 社のデュアル・フルブリッジドライバ L298 を実装した Arduino Motor Shield を使用した。本実験では Arduino ボードへのダメージを避け、安定した電流値を得るために直流安定化電源 PMC18-3A を電源として使用し、ノート PC から Arduino を介して送られる PWM 信号によってモータの回転制御を行う。

デュアル・フルブリッジドライバ L298 は、2つの DC モータまたは 1つのステッピングモータを制御可能であり、フリーランストップ機能とブレーキ機能を搭載している。動作電圧は 5～12V、最大電流は各チャンネル 2A となっている⁽⁶⁾。

Arduino Motor Shield では、モータのスピードや回転方向を制御できる他に、モータの電流消費を計測することができる。しかしながら、本実験では PWM 制御にてモータを制御していたため安定した電流値が得られず、モータの回転制御のみに使用した。



Fig. 3.9 Arduino Motor Shield

次に Arduino IDE によるプログラミングについて説明する。本研究で作成したプログラムは Appendix に記載する。

1. void setup()関数

Arduino 電源投入時に 1 度だけ処理を行う関数で、シリアル通信や DC モータの初期設定をする。

2. void loop()関数

void setup()関数のあとに繰り返し実行されるメイン関数。本研究では常にシリアル通信の入力待ちをさせた。

3. アナログ入力

光センサとモータに掛かる電流・電圧のアナログ出力を読み取るために void loop()関数内で analogRead()関数を使用した。0V から 5V の入力電圧に対し分解能は 10 ビットでビット分解能は約 4.9mV となる。

4. シリアル通信の設定

シリアル通信の初期設定を行うために void setup()関数内のボーレートを 9600bps とし、void loop()関数内でシリアル通信の入力がある場合に Hello world と出力する例を以下に示す。

```
void setup(){
    Serial.begin(9600);
}
void loop(){
    if(Serial.available()>0){
        Serial.println("Hello world");
    }
}
```

5. DC モータの設定

Arduino でモータを PWM 制御するために、void setup()関数内で初期設定として pinMode()関数の引数に出力ピン番号、モードをそれぞれ指定し、ピンを出力用に設定する。void loop()関数内で digitalWrite()関数で HIGH と LOW を指定する。

```
void setup(){
    pinMode(12,OUTPUT);
    pinMode(9,OUTPUT);
}
void loop(){
    digitalWrite(12,HIGH);
    digitalWrite(9,LOW);
    analogWrite(3,rpm);
}
```

- XBee

模型船のプロペラ回転の制御信号の送信およびモータに掛かる電圧・電流の受信に ISM2.4GHz 帯近距離無線通信モジュール ZigBeeXB24-Z7SIT-004 のシリアル無線モデムモードでピアツーピア型ネットワークを試みた。シリアル無線モデムモードは XBee の設定を行うアプリケーションソフト X-CTU で互いのアドレスを書き込むことで設定できる。主要な仕様は動作電圧 2.1~3.6V、最大通信速度 250kbps、ボーレート 1200bps~1Mbps、アーバンレンジ 40m まで設定可能である。

Arduino と XBee は Arduino Wireless Shield で接続される。また、ノート PC においてはシリアルインターフェース基板を介して接続されるためノート PC では XBee は仮想 com ポートとして認識され単純にシリアル通信をする要領で通信が可能となる。

無線モジュールに XBee を用いるメリットとして、bluetooth より通信速度は遅いが省電力に通信できることが挙げられる。しかしながら、本実験では常時データを受信するため、通信速度が足りずデータの受信が滞ることがあり使用を断念した。

- SD カード

Arduino と Arduino Wireless Shield を接続し、SD カードを利用するために用意された SD ライブラリを利用することで容易にデータロガーを実現することができる。ファイルシステムは FAT もしくは FAT32 であるので、PC を用いて読み出すことができる。インターフェースは SPI バスを使用している。SPI バスは低速ではあるが SD カードと容易に接続が可能である。

SD ライブラリは、SD カードのファイル、ディレクトリに対する処理を行う SD class と SD class の open メソッドで開いたファイルに読み書きなどの処理を分担する File class とで構成されている。ファイルの処理を行うためにファイルのオープン処理にてファイル・クラスのインスタンスを得る。File ファイル変数 = SD.open(ファイル名)で設定する。扱えるファイルはそれぞれの時点で一つだけであるので、ファイル変数.close()というメソッドを用いてクローズしてから次に進む。このメソッドを行わないとファイルに書き込みしたデータを保存できず、読み込むことができない。クローズの処理を行うとモータ制御が不安定となるため、本実験での使用は断念した。

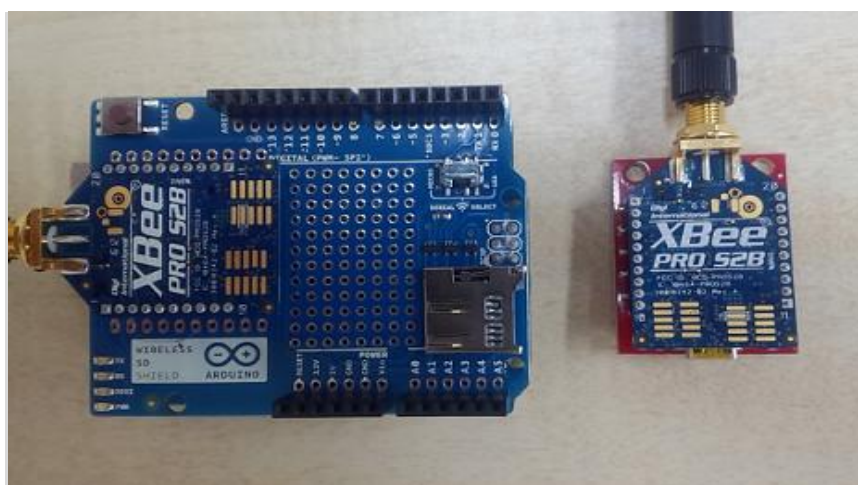


Fig. 3.10 Arduino Wireless Shield and Xbee Explorer USB

- バッテリー

先述の Arduino の電源は Graupner 製シールドバッテリーを使用した。以下に外観と仕様を示す。



Fig. 3.11 Battery used for the experiment

Table 3.3 Specification of the battery

	Graupner 製
電圧(V)	6.0
容量(mAh)	3000
サイズ(mm)	134*34*60
重量(g)	625

- 外部電源

先述の DC モータの電源は Arduino Motor Shield を介して直流安定化電源 PMC18-3A から供給した。これは負荷が変化しても出力電圧を一定に保つ定電圧電源としての機能を有している。出力電圧は設定した電圧値になるように一定に保たれ、出力電流は $I = V_s / R_L$ の関係により決定している。そのため、モータに掛かる負荷変化に対しての電流変化を計測することが可能である。本実験では出力電圧を 12V 一定に設定した。以下に外観と仕様を示す。



Fig. 3.12 Power supply used for the experiment

Table 3.4 Specification of the power supply

	PMC 18-3A
入力電源	AC 100V
可変電圧範囲(V)	0~18
サイズ(mm)	107*140*300
重量(g)	5000

3.5 実験条件

実験条件を Table 3.5 と Table 3.6 に示す。

Table 3. 5 は船速に見合うプロペラ回転数(以下、平水中自航プロペラ回転数と呼ぶ)を示しており、実船で 4knots から 2knots 刻みで 10knots までと 11knots を加えた 5 段階になるように設定している。

Table 3. 6 は船速変化を再現するために用いた回流水槽の流速およびインペラ回転数を示しており、Table 3. 5 に示した実船船速を含む前後 4knots まで 1knots 刻みで計 9 段階の流速で計測を行った。回流水槽における流速の設定はインペラ回転数をデジタルスイッチで指定することで行っている。本実験では平水中自航プロペラ回転数を制御するため外部電源による出力電圧は 12V 一定とした。

Table 3.5 Propeller revolutions suitable for each ship speed

U(ship)	U(model)	F_n	Number of propeller revolutions
11knots	0.89m/s	0.267	1270 rpm
10knots	0.81m/s	0.242	1110 rpm
8knots	0.65m/s	0.194	880 rpm
6knots	0.49m/s	0.145	720 rpm
4knots	0.33m/s	0.096	510 rpm

Table3.6 Ship speed and Froude number , Number of impellers revolutions

U(ship)	U(model)	Fn	Number of impellers revolutions
15knots	1.22m/s	0.363	214 rpm
14knots	1.14m/s	0.339	202 rpm
13knots	1.06m/s	0.315	188 rpm
12knots	0.98m/s	0.291	177 rpm
11knots	0.89m/s	0.267	160 rpm
10knots	0.81m/s	0.242	145 rpm
9knots	0.73m/s	0.218	131 rpm
8knots	0.65m/s	0.194	115 rpm
7knots	0.57m/s	0.170	101 rpm
6knots	0.49m/s	0.145	88 rpm
5knots	0.41m/s	0.121	72 rpm
4knots	0.33m/s	0.097	58 rpm
3knots	0.24m/s	0.073	42 rpm
2knots	0.16m/s	0.048	28 rpm

3.6 実験方法

まず回流水槽を用いた本実験を行うために、平水中自航プロペラ回転数を調べた。本実験では実船船速 4・6・8・10・11knots を想定した。具体的な実験手順を以下に示す。

1. 流速 0m/s において模型船を水槽中央に設置した状態で舵角・斜航角をゼロとし、三分力計のゼロ点調整を行う。
2. インペラを回し流速を安定させる。流速の計測はプロペラ式流速計を用い、水槽中央で行う。
3. 流速安定後、三分力計で計測される X-Force がゼロとなるよう模型船のプロペラ回転数を調整する。
4. 三分力計で計測される X-Force が概ねゼロとなった時のプロペラ回転数および PWM 入力値を記録し、平水中自航プロペラ回転数とした。

燃料消費量を計測するために、平水中自航プロペラ回転数を一定に保ち、回流水槽内の流れが Table 3.5 の船速と等しくなるように調整した。流速は Table 3.5 に示した実船船速を含む前後 4knots まで 1knots 刻みで計 9 段階変化させ、マイナス 4knots から始め、プラス 4knots まで 1knots 刻みで変化させ、その間の電圧・電流を計測した。具体的な実験手順を以下に示す。

1. 制御プログラム内の平水中自航プロペラ回転数を書き換え、Arduino UNO に書き込む。
2. 流速 0m/s において模型船を水槽中央にずらし、三分力計のゼロ点調整を行う。
3. 実船船速からマイナス 4knots の船速になるようにインペラを回し流速を安定させる。
4. 流速安定後、ノート PC から実船船速の制御信号を送りプロペラを回転させ、電圧・電流の計測を開始する。Arduino Motor Shield および三分力計の記録も開始する。
5. プロペラ回転数が設定値で安定していることを確認後、外部電源の電圧値および電流値を読み取る。
6. Table 3.6 にしたがって流速を 1knots 上げ、定常状態を確認し、5 を行う。
7. 6 を実船船速のプラス 4knots まで繰り返す。
8. 実船船速プラス 4knots まで計測したら、記録を終える。
9. 実船船速を変化させ 1 から 8 を繰り返す。

第4章 実験結果

4.1 緒言

本章では本研究における模型船実験の結果を詳述する。本研究における電力は、オシロスコープにより計測された PWM 制御時の電圧と外部電源に表示される電流値を乗じたものである。

4.2 本実験における電圧

本研究におけるモータへの供給電圧は、オシロスコープにより計測されたピーク電圧およびデューティ比を用いて算出した。モータの電圧値には、逆起電力が影響しているため、ピーク電圧はモータ接続状態で計測したが、デューティ比はモータを外しての計測とした。いずれも無負荷状態での計測である。Table 4.1 では、オシロスコープで計測した結果を示し、最右辺に本実験で用いた電圧値を示している。

実験解析当初、電圧は外部電源の供給電圧 12V 一定として計算を行っていた。しかしモータの逆起電力が電力に大きく影響していることから、逆起電力の計測を行い、PWM 制御における電圧を算出し解析を行った。PWM 制御とは、周期一定で入力信号の大きさに応じてパルス幅のデューティ・サイクルを変え、モータへの供給エネルギーを制御するやり方である。

Table 4.1 Measured voltage by digital storage scope.

Ship speed	Peak voltage(V)	PW(+),(ms)	PW(-),(ms)	Voltage (V)
4knots	9	0.522	1.52	2.30
6knots	8	0.692	1.352	2.71
8knots	6.5	0.931	1.112	2.96
10knots	5.5	1.282	0.76	3.45
11knots	4.5	1.588	0.454	3.50

4.3 モータ消費電力の計測結果

Table 4.2 は定常状態で計測された電流値及び PWM 制御における供給電圧を示している。本研究における、電力は Table 4.2 の電圧と電流を乗ずることで算出している。

Fig. 4.1 は各船速においてプロペラ推力と三分力計で計測される抗力とが打ち消し合っている際のモータの電力を示している。横軸は船速(knots)、縦軸は電力(W)を示している。図中のマーカーは本研究の実験結果であり、実線は近似曲線である。船速が速くなるにつれ抗力も大きくなり、打ち消すためのプロペラ回転数も上がる。モータの電力は船速に応じて上昇しているので、本研究における電力の計測は妥当である。

Fig. 4.2 にはプロペラ回転数一定における船速変化に対する電力変化を示している。横軸は船速と流速の差を示しており、縦軸は推力と抗力が打ち消し合っている際の電力からの差を示している。Fig. 4.3 は Fig. 4.2 をまとめ各船速で比較したグラフである。図中のマーカーは本研究の実験結果であり、実線は近似直線である。なお、本研究の実験条件の船速 4knots におけるマイナス 3knots は、回流水槽において 1knots 相当の流速を再現することができなかったため計測していない。またマイナス 4knots は流速がなくなってしまい、実船では起こりえないため計測していない。

Fig. 4.3 から船速の増加に応じて近似直線の傾きの絶対値も増大している。なので、同じ電力の変化量であっても船速が速くなるほど消費電力が大きくなる傾向が見られる。各船速においてプラス 3knots の流速の時、電力が増加もしくは変化しないという結果が見られた。プラス 3knots と言っても絶対的な流速は異なるため、モータ特性が原因ではないかと考える。

Table 4.2 Result of current and voltage

Ship speed	Voltage (V)	Difference of ship speed (knots)								
		-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
		Current (A)								
4knots	2.30			0.82	0.81	0.81	0.80	0.80	0.81	0.79
6knots	2.71	0.88	0.87	0.85	0.84	0.83	0.82	0.81	0.81	0.80
8knots	2.96	0.98	0.97	0.94	0.94	0.92	0.91	0.91	0.91	0.90
10knots	3.45	1.05	1.03	1.04	1.02	1.02	0.99	0.98	0.99	0.99
11knots	3.50	1.22	1.21	1.19	1.18	1.17	1.13	1.11	1.12	1.08

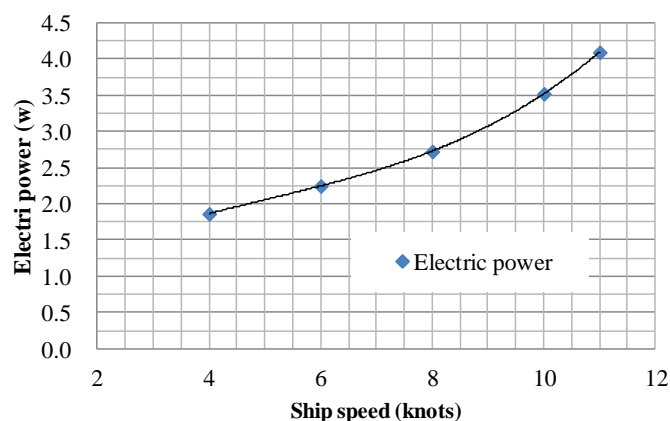


Fig. 4.1 Electric power suitable for ship speed

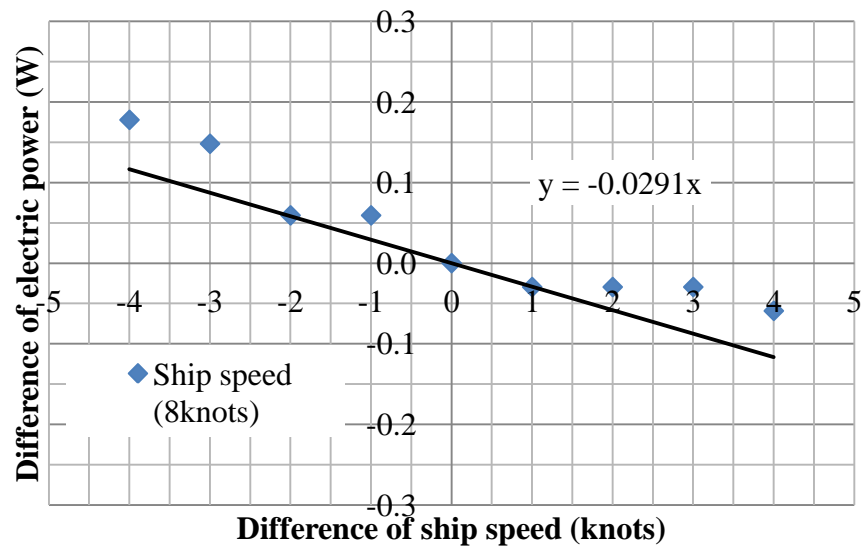
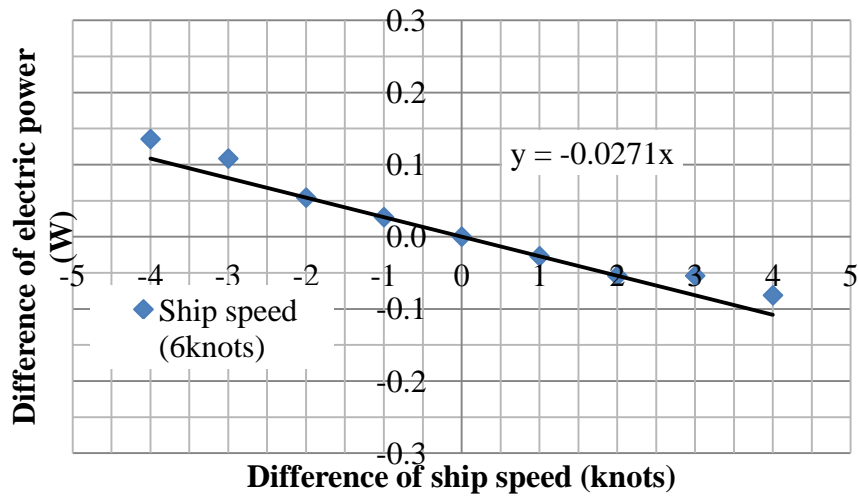
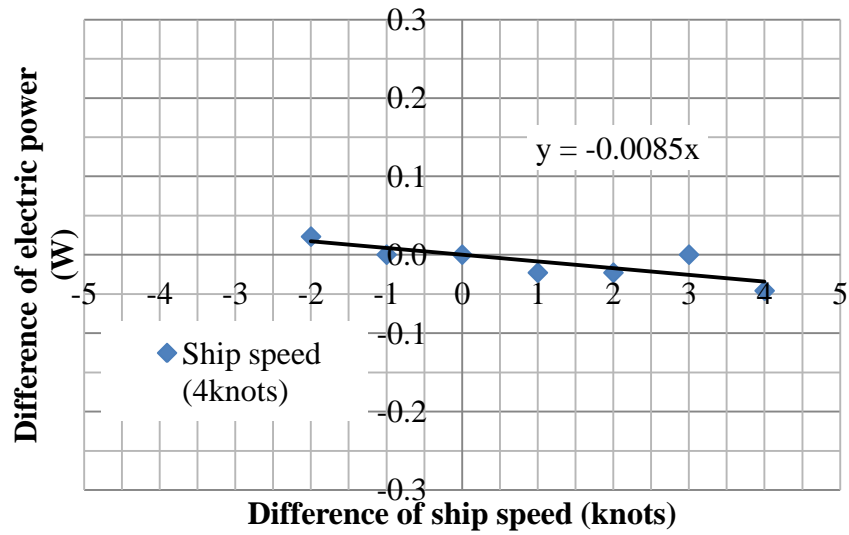


Fig. 4.2 Relationship of the electric power in changing flow speed in case of each ship speed (Continued on the next page)

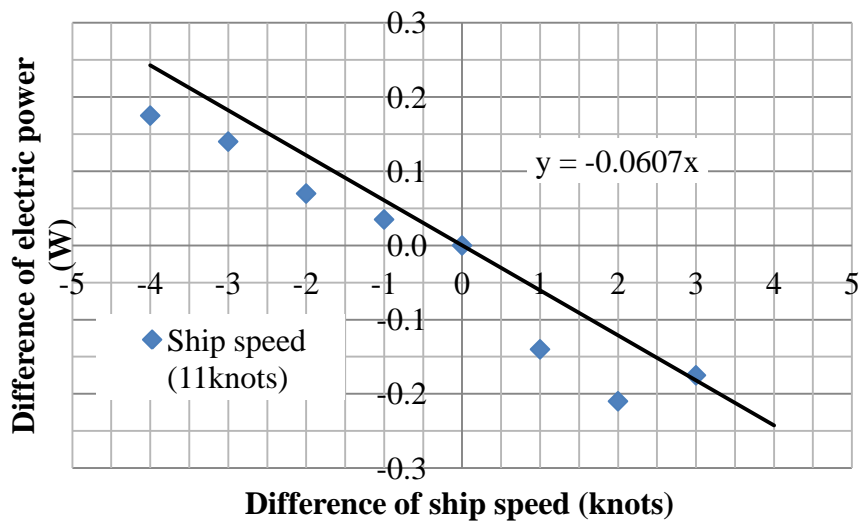
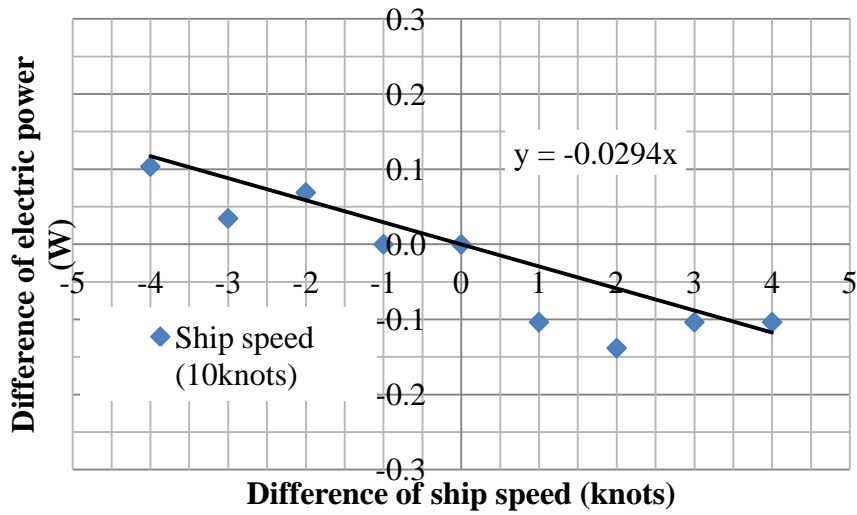


Fig. 4.2 Relationship of the electric power in changing flow speed in case of each ship speed

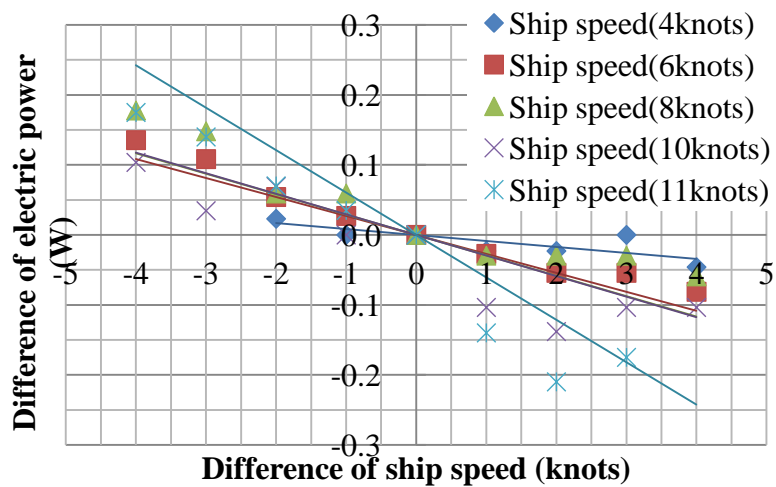


Fig. 4.3 Relationship between electric power and deviation of flow speed

4.4 プロペラ負荷による電力変化の推定

Table 4.3 は Fig. 4.2 における各船速の近似直線の傾きをまとめた表であり、Fig. 4.4 は Table 4.3 をグラフ化したものである。

Fig. 4.4 の近似直線は、任意の船速によるプロペラ負荷に対する消費電力変化の傾きを示しており、近似直線の式を次に示す。

$$y = -0.0041x \quad (4.1)$$

本研究では(4.1)式を用いて任意の船速におけるプロペラ負荷に対する消費電力を求める式の傾きを算出している。

Table 4.3 Result of inclination of electric power

Ship speed	Inclination of electric power
4knots	-0.0085
6knots	-0.0271
8knots	-0.0291
10knots	-0.0294
11knots	-0.0607

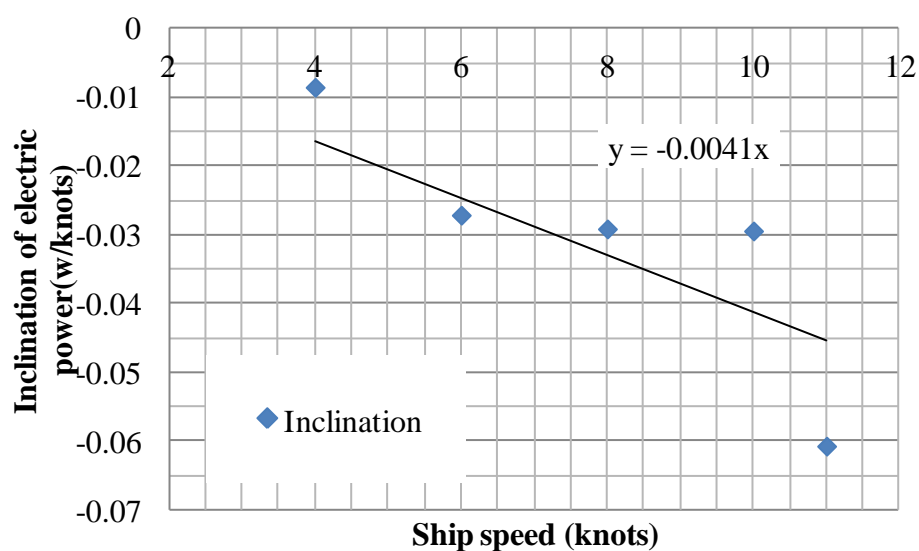


Fig. 4.4 Change of the inclination of electric power

4.5 モータによる電力消費量の推定

本実験で計測された電力には、モータ以外による消費電力も含まれている。そのため、モータ以外による消費電力を推定し総電力から減じ、モータのみによる消費電力を算出する必要がある。

ウェザールーティングにおけるエンジン出力の推定式を次に示す。

$$P = an^3 + b\Delta V + c\Delta V^2 \quad (\text{kW}) \quad (4.2)$$

ただし、 P はエンジン出力、 n はプロペラ回転数(rpm)、 ΔV は波浪中における減速量(knots)、 a, b, c は統計解析によって求められる係数を表す。

本実験では波浪がないので、 $y = ax^3 + b$ という式で Fig. 4.1 で示した計測結果を近似し、 b をモータ以外による消費電力と仮定した。計測結果の近似には Microsoft Office Excel のソルバーによる最小二乗法を用いた。ソルバーは最小二乗法を用いた目的関数の探索機能で反復回数や収束精度を任意に設定できる。その結果の近似式を次に示す。

$$y = 0.001715x^3 + 1.82 \quad (4.3)$$

(4.3)式により模型船における任意の船速での消費電力を算出することができ、モータ以外の消費電力は 1.82 (W)である。

Fig. 4.5 はプロペラ駆動なしにおける三分力計で計測される抗力の計測値と新造時における汐路丸の馬力曲線との比較を示している。重なっているところは少ないが、傾向が一致している。そこで実船と模型船における燃料消費量の相関関係を知るために、電力を抗力に合わせるキャリブレーションを行った。

Fig. 4.6 はモータ以外の消費電力を減じ、モータのみによる消費電力および抗力の仕事率を示している。横軸は船速 (knots)を示し、縦軸は仕事率 (W)を示している。Fig. 4.6 に示す抗力はプロペラを回転させない状態における三分力計による計測値である。電力を効力に合わせるために、抗力と電力の関係を Fig. 4.7 に示す。Fig. 4.7 は横軸に抗力(W)を示し、縦軸に電力(W)を示している。Fig. 4.7 での近似直線の傾きをキャリブレーション値とした。通常、理論的に相関係数を出すところを本研究においては実験的に算出した。

$$y = 0.4275x \quad (4.4)$$

0.4275 を計測結果に掛けることで、模型船の燃料消費を算出している。また、0.4275 はモータにおける推進効率を示している。ディーゼルエンジンにおける熱効率は通常 60%以上であるため、モータにおける電気効率は熱効率より悪いことがわかる。

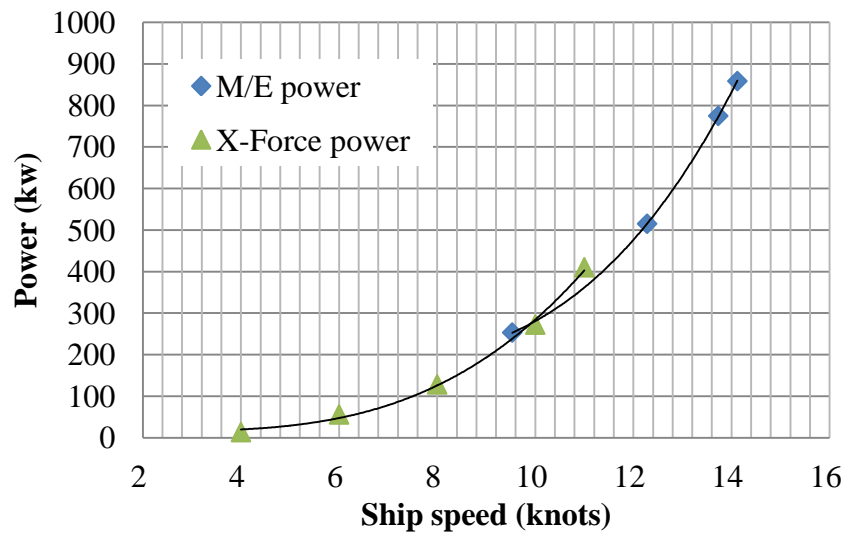


Fig. 4.5 Main engine horse power curve and measured X-Force.

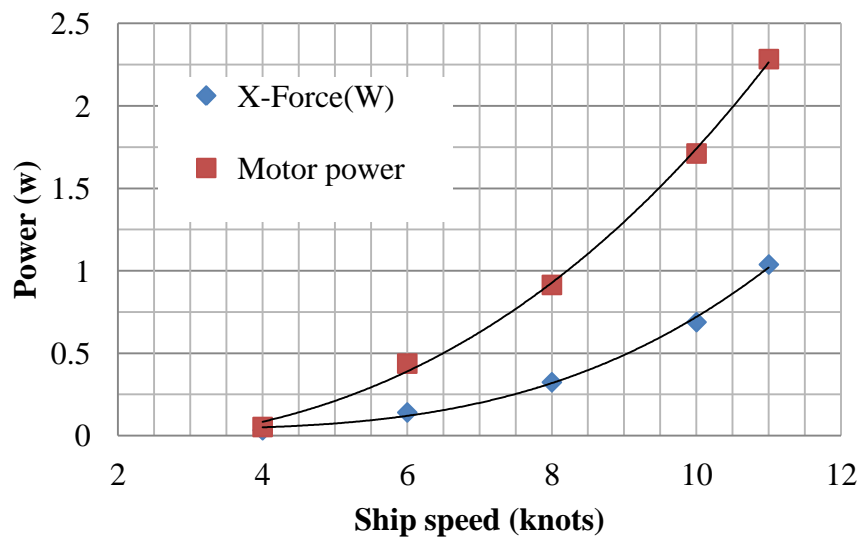


Fig. 4.6 Measured X-Force and electric power.

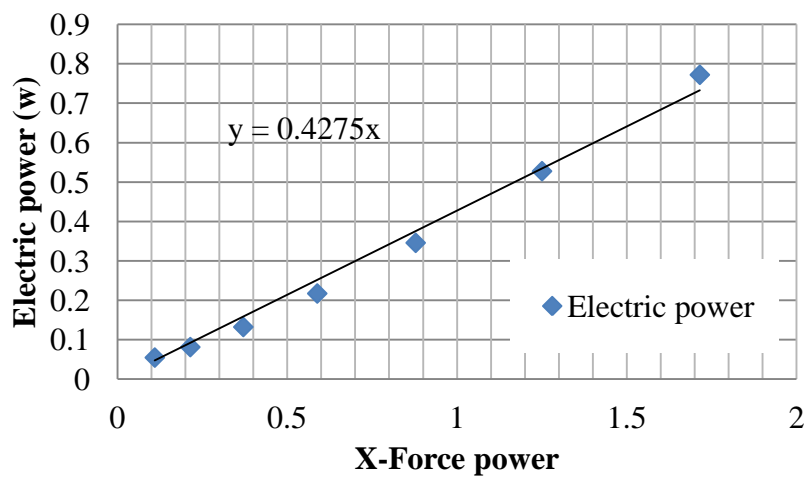


Fig. 4.7 Relationship between the electric power and X-Force.

4.6 実船実験との比較

本研究における模型船実験の有効性を確認するために、第 2 章で詳述した実船実験との比較を行った。

まず実船実験との比較を行うために実船実験の条件を模型船実験に当てはめた。具体的な手順を以下に示す。

1. 実船実験における平均船速である 9.3 knots を(4.1)式の x に代入し、9.3knots でのプロペラ負荷に対する電力変化の傾き -0.038 を得る。
2. (4.3)式により 9.3knots のモータのみの消費電力 1.38(W)を得る。
3. (4.4)式により模型船の消費電力を 0.59 を得る。
4. 1 と 3 により、速力変化による消費電力を求める式は $y = -0.038x + 0.59$ となる。
5. Table 2.2 に示す船速と平均船速 9.3knots との差を求め、その差を 4 の式に代入し、モータの消費電力を得る。
6. 4 で得た結果を、実船のスケールにするために次元解析を用い、スケール比の 3.5 乗をし、清水と海水の比重の違いを考慮する。

上記の手順で求めた結果を Table 4.4 に示す。また得られた結果を用い近似曲線をソルバーで求め、調和解析を行った。その結果をグラフ化したのが Fig. 4.8 である。マーカーは計測結果を示し、正弦曲線は調和解析の結果を示している。Fig. 4.8 は船速変化と消費電力の関係を示している。また実船実験の結果と比較したグラフを Fig. 4.9 に示す。

Fig. 4.8 から船速変化と消費電力は正弦関数で近似できることが見られる。Fig. 4.9 から実船結果と模型船実験結果の傾向は概ね一致しており、本研究における実験方法は定性的に有効であると言える。

模型船実験におけるモータ出力の振幅率は約 11% であり、実船実験の 12% である。また模型船実験におけるモータの平均出力は 234kW に対し、実船実験では 505kW である。本研究における模型船実験では、実船における波浪や風などの外乱影響を船速変化のみで再現しているため、実船実験との結果と差が生じていると考える。またプロペラ周りの流場はレイノルズ数で支配されていることも原因と考える。平均出力の差に関しては、本研究では汐路丸新造時の馬力曲線を用いたため、経年変化が含まれておらず、現在の馬力曲線とは異なることが大きな原因であると考ええる。

Table 4.4 Ship course and motor power

Run	Ship course (deg)	Ship speed (knots)	Motor power (kW)
A	180	8.3	247.98
B	360	10.4	216.46
C	240	7.3	262.98
D	120	9.9	223.97
E	60	10.7	211.96
F	0	10.5	214.96

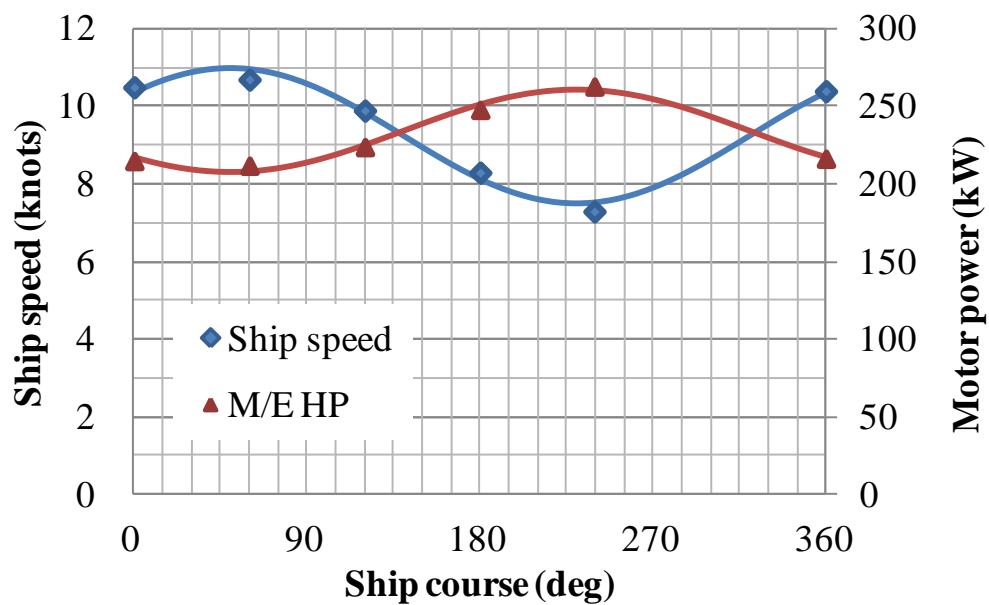


Fig. 4.8 Change of the ship speed and the motor power with the ship course

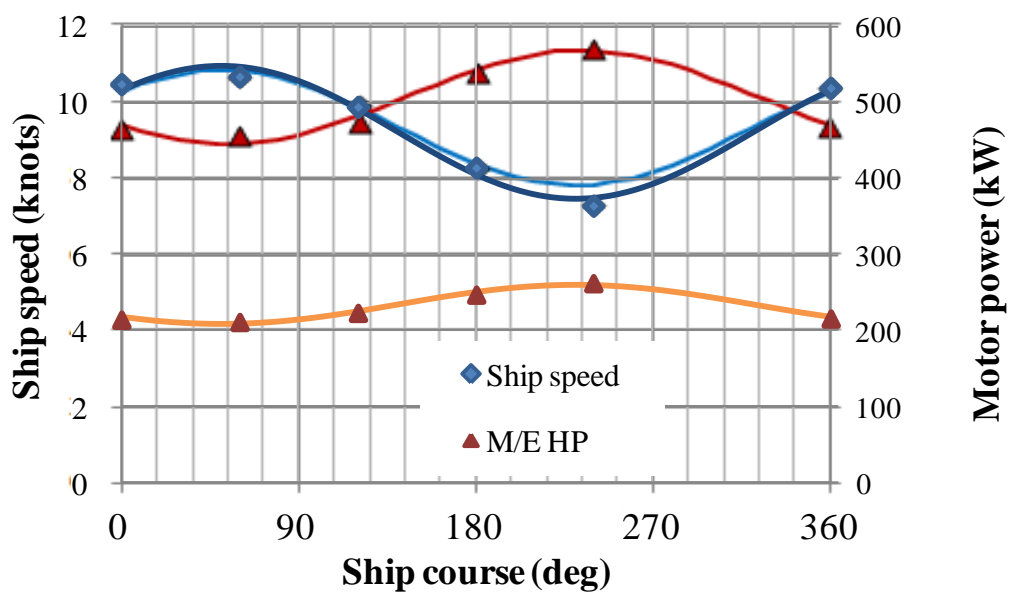


Fig. 4.9 Comparison between full-scale ship and model ship

4.7 結言

本章では実験結果および実船実験との比較を行った。得られた結果および考察を以下にまとめる。

- プロペラ回転数を一定に制御し、回流水槽の流速を変化することで波浪中の速力変化を再現でき、プロペラ負荷変動から消費電力変化を計測できた。
- モータによる消費電力の修正方法には、三次関数での近似直線の切片をモータ以外の消費電力として減じることが有効である。
- 模型船と実船とのキャリブレーション値を実験的に求めたことで、モータによる推進効率を得ることができた。
- 実船実験結果との差は、模型船実験では、実船における波浪や風などの外乱影響を船速変化のみで再現していることが原因であると言える。
- 実船との平均出力の差は、本研究では汐路丸新造時の馬力曲線を用いたため、経年変化が含まれておらず、現在の馬力曲線とは異なることが大きな原因であると言える。

第5章 結論

本研究は模型船を用いて燃料消費量を推定することを目的として、本学の垂直循環型回流水槽において模型船を用いたプロペラ負荷に対する電力変化を求める実験方法を考案し実施した。また実船実験結果との比較を行い、模型船実験の有効性を検証した。得られた結果と今後の課題を以下にまとめる。

- プロペラ回転数を一定に制御し、回流水槽の流速を変化することで波浪中の速力変化を再現でき、プロペラ負荷変動から消費電力変化を計測できた。
 - モータによる消費電力の修正方法には、三次関数での近似直線の切片をモータ以外の消費電力として減じることが有効である。
 - 三分力計で計測した抗力と汐路丸の馬力曲線が概ね一致した。
 - 模型船と実船とのキャリブレーション値を実験的に求めたことで、モータによる推進効率を得ることができた。
 - 模型船を用いた燃料消費量を推定する実験方法を提案した。
 - 本実験結果と実船実験との比較を行ったところ、実船実験での結果と傾向が概ね一致したので、模型船での計測実験は定性的に有効である。
-
- 速力がプラス 3knots の時の電力上昇の原因が正確に判明できていないので、解明する必要がある。
 - 実船との差の原因と考えられるモータ特性を更に分析および数値化し、モータによる影響を評価する必要がある。
 - 推進効率およびプロペラ効率をより正確に求めるため、プロペラ位置における流速の計測を行う必要がある。
 - 現在の馬力曲線を用いた解析を行う必要がある。
 - モータ負荷状態における PWM 制御時の電圧の計測が必要である。
 - 自航状態における実験への発展が必要である。

参考文献

- (1) Rameswar Bhattacharyya : “Dynamics of marine vehicles” , Ocean engineering: a Wiley series / editor Michael E. McCormick , 1978.
- (2) 高嶋恭子、萩原秀樹、庄司るり : ウェザールレーティングによる燃料節約、日本航海学会 論文集 111 号,平成 16 年.
- (3) Toshio Iseki , Ulrik D.Nielsen : “Study on method for estimating fuel consumption in a seaway” , OMAE2013-10990.
- (4) RS-380PH Data Sheet , Mabuchi Motor.
- (5) ATmega328P Data Sheet.
- (6) L298 Data Sheet.

謝辞

本研究は東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科博士前期課程海運ロジスティクス専攻中に、同大学海洋工学部・井関俊夫教授のもとで行った研究をまとめたものである。

本研究を行うに際して、井関俊夫教授には研究テーマの示唆以来、終始温かく丁寧なご指導とご教授を頂きました。

操船論研究室関係者の方々、博士前期課程 2 年 Kyu Keitou 氏、Kang Byung Hos 氏、学部 4 年 Jiang Changqing 氏、小池達矢氏、濱田聡氏、高見澤成秋氏には大変お世話になりました。博士前期課程 1 年齋藤瑛氏には実験準備当初から最後までお手伝いを頂き、大変助かりました。

末筆ながらこの紙上をお借りして皆様のご厚意に厚く御礼申し上げます。

最後に、大学院進学にご理解いただき、全面的に支え応援してくれた家族に感謝致します。

Appendix

```
int val;
int rpm1;
char demand[6];
long cur;
int volt;

unsigned long time1;
unsigned long time2;
unsigned long time3;
unsigned int rpm2;
unsigned int rpm3;
int sensorPin = A2;
unsigned int rpm_sum;
unsigned int cur_sum;
int count;
int label;

void setup() {
    pinMode(12, OUTPUT);
    pinMode(9, OUTPUT);
    Serial.begin(9600);
    digitalWrite(12, HIGH); // A,12 B13
    digitalWrite(9, LOW);  //A,9 B,8
}

//シリアル通信の入力待ち
void Serial_gets(char*DEMAND,char fin){
    char c;
    int i = 0;
    while(1){
        if(Serial.available()){
            c = Serial.read();
            Serial.print(c);
            DEMAND[i] = c;
            i++;
            if(c == fin) break;
        }
    }
}
```

```

    }
}
Serial.println();
}

void loop(){
    if(Serial.available()){
        Serial_gets(demand, '/');
        rpm1 = atoi(demand);
        analogWrite(3, rpm1); //A,3 B,11
    }
}

```

//回転数の算出

```

time1 = millis();
label:
if(analogRead(sensorPin)<341){
    goto label;
}
time2 = millis();
time3 = (time2 - time1) * 2;
if(time3>20){
    rpm2 = 60000 / time3;
    rpm_sum+= rpm2;
    count++;
    if(count>30){
        rpm3 = rpm_sum / 30;
        Serial.print(rpm3);
    }
}

```

//回転数の制御

```

if(rpm3>1205){
    Serial.print(" ,high");
    rpm1 = rpm1 - 1;
    analogWrite(3, rpm1); //A,3 B,11
}
else if(1206>rpm3,rpm3>1194){
    Serial.print(" ,right on");
}
else if(rpm3<1195){

```

```

    Serial.print(" ,low");
    rpm1 = rpm1 + 1;
    analogWrite(3, rpm1); //A,3 B,11
}
    count = 0;
    rpm_sum = 0;
//電圧、電流の計測
    volt = analogRead(4);
    Serial.print(" , volt=");
    Serial.print(volt);
    cur = analogRead(0);
    Serial.print(" , current=");
    Serial.println(cur);
}
}
}

```